

УДК 622.1 + 550.3

**РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ПОДКАРЬЕРНОГО МАССИВА РУДНИКА “МИР” АК “АЛРОСА”**

**В. Д. Барышников<sup>1</sup>, А. С. Федянин<sup>2</sup>, Э. К. Пуль<sup>2</sup>, Д. В. Барышников<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vbar@misd.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*АК “АЛРОСА”, E-mail: mgok@alrosa.ru,  
Молодежный пер., 3, 678174, г. Мирный, Республика Саха (Якутия)*

Предложены методы и средства наблюдений за деформациями и смещениями рудной потолчины при отработке подкарьерных запасов на руднике “Мир” АК “АЛРОСА” с применением слоевой камерно-целиковой системы разработки с твердеющей закладкой. Приведены схема расположения наблюдательных станций и результаты геомеханического мониторинга подкарьерного массива. Установлены закономерности оседания рудного массива на нижней границе предохранительного целика.

*Предохранительный целик, рудная потолчина, геомеханический мониторинг, водоносный комплекс, осадка, сдвигание, деформация, реперная станция, профильная линия*

Отработка запасов переходной зоны от открытой к подземной разработке характеризуется большей сложностью с точки зрения обеспечения безопасности горных работ независимо от принятой системы разработки (с обрушением или закладкой) [1]. Прежде всего это связано с ведением очистных работ в условиях предельного состояния бортов карьера и технологического влияния открытых горных работ на состояние подкарьерной толщи пород и, как следствие, устойчивость горных выработок. Отработанный карьер является потенциальным источником скопления паводковых вод и атмосферных осадков, что требует дополнительных мер по управлению гидрогеомеханической ситуацией, особенно при разработке месторождений в суровых климатических условиях Севера.

В [2, 3] рассмотрены общие закономерности сдвижения горных пород под влиянием подземных и открытых горных работ, описаны методы охраны сооружений и способы расчета деформаций горных пород и земной поверхности. Геомеханические особенности, возможные варианты отработки запасов переходной зоны и организация систем мониторинга для условий кимберлитовых месторождений Якутии отражены в [4–9]. В соответствии с [10] при комбинированной отработке запасов переходной зоны необходим обязательный гидрогеомеханический мониторинг (ГГМ) состояния массива горных пород.

Отработка открытым способом кимберлитовой трубки “Мир” АК “Алроса” (Саха, Якутия) субвертикального падения проводилась с 1957 по 2000 г. до глубины карьера 525 м (а.о. — 190 м). В плане трубка имеет форму неправильного овала, размеры которого на дневной поверхности составляют по длинной оси — около 500 м, по короткой — 330 м. Размеры трубки с глубиной постепенно сужаются, приобретая воронкообразную форму.

Работа выполнена при финансовой поддержке АК “АЛРОСА”

Вмещающие трубку породы представлены осадочными (сульфатно-карбонатные и галогенно-карбонатные) и магматическими (вулканогенная и трапповая формации) отложениями. В составе осадочных пород преобладают известняки, доломиты, гипсы и соли [11].

Осложняющим фактором при разработке месторождения является наличие мощного (150–180 м) высоконапорного метегеро-ичерского водоносного комплекса (МИВК), вскрытого при ведении открытой разработки. Статические напоры под кровлей водоносного пласта, представленного трещиноватой и кавернозной толщей карбонатных пород, достигают 175–216 м, общая минерализация подземных вод — до 130 г/дм<sup>3</sup>. По химическому составу воды МИВК — сероводородные хлоридно-натриевые рассолы с растворенными природными газами, в основном углеводно-азотными. Сероводорода содержится 88–137 г/дм<sup>3</sup> [11].

В соответствии с проектом Института “Якутнипроалмаз” отработка подкарьерных запасов осуществляется с применением слоевой нисходящей системы разработки по камерно-целиковой схеме с комбайновой выемкой и твердеющей закладкой. Горные работы под водным объектом в карьере проводятся под защитой предохранительного целика, мощность которого по расчетным данным принята равной 20 м. Для защиты подземных выработок от затопления на руднике реализована система “сухой” консервации в карьере, проект которой разработан Научно-техническим и экспертным центром новых экотехнологий в гидрогеологии и гидротехнике “Новотэк” (г. Белгород, 2000 г.). Она включает засыпку дна карьера вскрышными породами на отм. –190 ÷ –145 м с прокладкой пленочного экрана на отм. –158 м, уложенного на глинистой отсыпке, водопроводящую штольню в борту карьера на отм. –152 м, сопряженную с четырьмя водоотливными скважинами, пробуренными с бермы карьера на отм. +235 м и оснащенную погружными насосами системы консервации [12]. Водопиток в карьер из МИВК составляет 1200–1250 м<sup>3</sup>/ч. Основная часть рассолов (до 85 %) откачивается системой консервации. Уровень зеркала воды при этом поддерживается постоянно на отм. –145 ÷ –150 м. Часть рассолов, проникающих ниже пленочного экрана, перехватывается дренажными скважинами, пробуренными из подземных горных выработок на гор. –210 м.

Для контроля геомеханической ситуации в предохранительном целике до начала очистных работ в блоке 1 ООО “Инситу” (г. Москва, 2011 г.) разработан комплексный проект гидрогеомеханического мониторинга (ГГМ), реализованный на руднике в 2012 г. Этим проектом предусматривалось проведение наблюдений за сдвижением подкарьерного массива по деформационным маркам, реперам профильных линий и инклинометрическим скважинам в горных выработках на отм. –210 м, расположенных вблизи нижней границы предохранительного целика.

В результате первоочередной отработки разрезного слоя 4 на отм. –235 ÷ –230 м на руднике сформирована подкарьерная потолочина мощностью 35–40 м (рис. 1). В процессе выемки разрезного слоя резко обострилась гидрогеомеханическая ситуация в выработках ВВ3 и ВВ4, используемых для ведения мониторинга. После принятия решения по их закладке большая часть наблюдательных станций была выведена из строя. В начале 2013 г. из-за деформаций обсадных пластиковых труб для контроля методом инклинометрии вертикальных сдвижений рудного массива и вмещающих пород в приконтактной зоне потолочины стало невозможным их дальнейшее применение.

Для предотвращения фильтрации рассолов из карьера через предохранительный целик и исключения их попадания в очистные выработки в рудном теле вблизи нижней границы потолочины были пройдены водосборники “Север”, “Центр” и “Юг” (отм. –214 ÷ –219 м). Данные геологического картирования состояния боков и кровли при проходке водосборников показали наличие многочисленных разноориентированных природных и техногенных трещин, в том числе от-

крытых. О локальных вертикальных подвижках по трещинам в массиве свидетельствует смятие обсадных труб при проведении инклинометрических наблюдений в скважинах на отм. –210 м. При нарушении сплошности подкарьерного массива, наличии открытых трещин и блоковых подвижек прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) предохранительного целика с помощью методов математического моделирования носит весьма условный характер, а полученные результаты не отражают реального геомеханического состояния подкарьерной потолочины. Единственным надежным средством контроля геомеханических процессов в подкарьерном массиве при отработке запасов блока 1 являются данные натурных наблюдений.

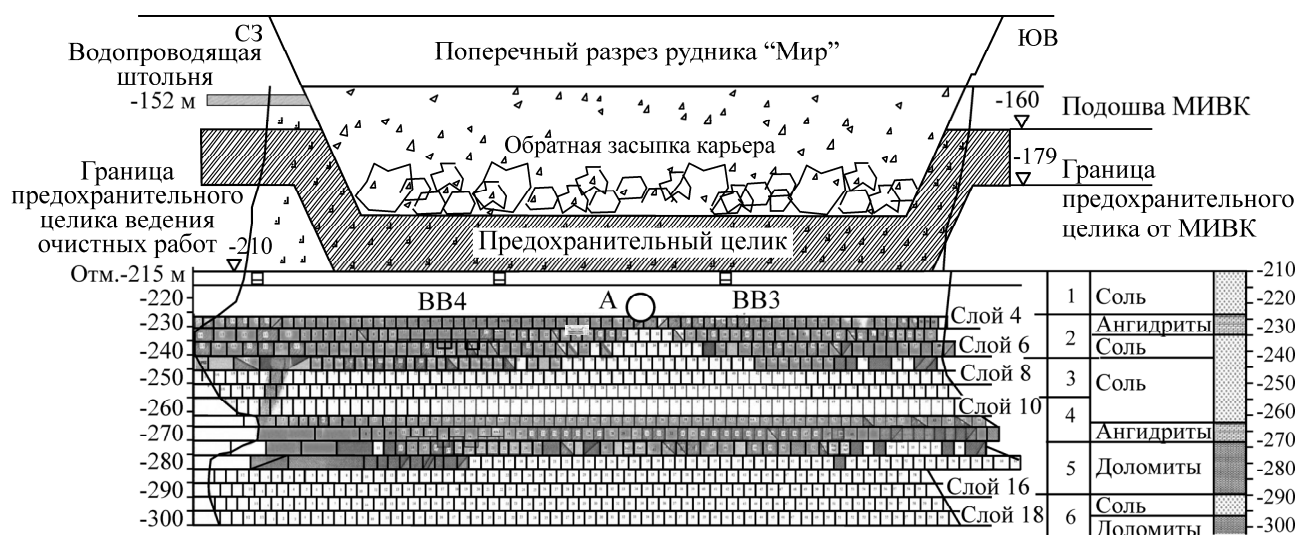


Рис. 1. Отработка очистных лент в блоке 1: ■ — отработанные очистные ленты; □ — ленты, планируемые к отработке; А — местоположение ленты 33 в слое 4

С учетом сложной гидрогеомеханической ситуации на руднике и на основе накопленного в ИГД СО РАН опыта ведения геомеханического мониторинга на подземных рудниках АК «Алроса» [13–16] Институтом «Якутнипроалмаз» в 2014 г. разработан проект ГГМ для решения следующих задач:

- оценка в пространстве и во времени сдвижений нижней части рудной потолочины на отм. –215 ÷ –230 м;
- построение мульды сдвижений по простиранию и вкрест простирания рудного тела на участках заложения станций;
- определение размеров зон возможного расслоения рудного массива на отм. –215 ÷ –230 м;
- контроль сдвижений закладочного массива разрезного слоя 4 при отработке нижележащих слоев в блоке 1;
- уточнение величины недозаклада и контроль их изменений в кровле разрезного слоя 4 в процессе его подработки;
- оценка механических свойств рудного и закладочного массивов на участках расположения наблюдательных станций;
- анализ результатов измерений сдвижений во взаимосвязке с расчетными данными при изменении горнотехнической ситуации в блоке и оперативное использование полученной информации для оценки геомеханического состояния рудной потолочины;
- уточнение параметров расчетной геомеханической модели по полученным экспериментальным данным для повышения надежности прогнозирования НДС конструктивных элементов систем разработки при дальнейшем понижении горных работ.

Геомеханический мониторинг предусматривает использование станций глубинных реперов (СГР) и реперов профильных линий (ПЛ) в комплексе со скважинами визуальных наблюдений (СВН) за состоянием их контуров с целью выбора мест закрепления реперов и установления зон трещинообразования и разрушения массива. Маркшейдерские наблюдения проводятся в соответствии с [17].

Схема расположения реперов профильной линии в доступной для наблюдения очистной ленте 33 показана на рис. 2.



Рис. 2. Схема расположения реперов профильной линии в кровле и почве ленты 33 слоя 4 на отм. – 230 м (разрез вдоль ленты 33, см. вид А на рис. 1)

Положение горных работ на время проведения начального цикла наблюдений в ленте 33 слоя 4 было следующим: отработан разрезной слой 4 и нижележащий слой 5 (за исключением лент 32–35 в слое 5), а также выполнены очистные работы в разрезном слое 11. Данные наблюдений за период с 11.10.2013 г. по 28.11.2013 г. (дальнейшие измерения из-за отсутствия доступа в ленту были прекращены) представлены на рис. 3.

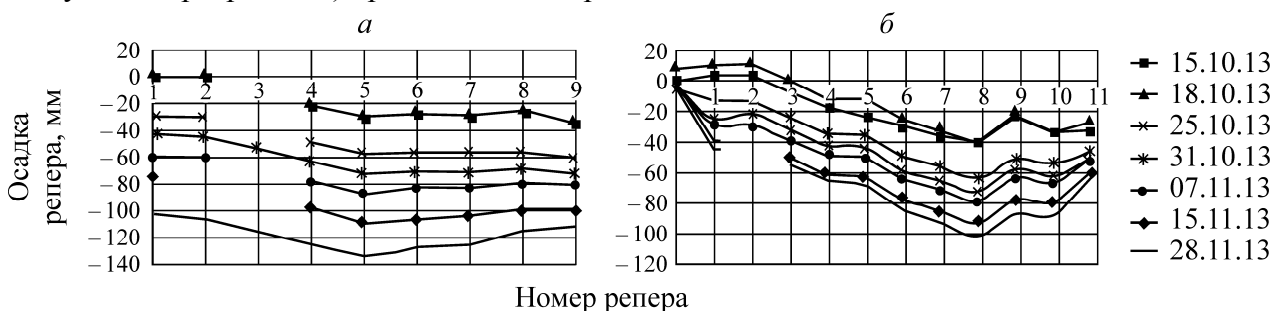


Рис. 3. Графики вертикальных смещений реперов в кровле (а) и в несущем слое закладки (б) ленты 33 (начальный отсчет 11.10.2013 г.)

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее:

- максимальная осадка кровли за весь период наблюдений (48 дней) отмечена в центральной части трубки (– 134 мм), что превышает максимальную осадку несущего слоя закладки в ленте 33 в этой зоне (– 102 мм) на 32 мм;

- приращения осадок реперов между циклами наблюдений примерно сохраняются, т. е. тенденции к стабилизации процесса сдвижений не наблюдается;

- максимальная скорость оседания в кровле составляет 84 мм/мес, а в почве — 64 мм/мес (превышение осадки руды в кровле по сравнению с почвой вызвано наличием локальных пустот в кровле ленты, закрепленной рамной крепью с деревянной затяжкой).

В связи с тем что подработка ленты 33 заходками в слое 5 за этот период не проводилась, осадка несущего слоя, равная осадке рудного массива в почве, может быть вызвана только одной причиной — ведением очистных работ в разрезном слое 11 второго подэтажа. С учетом

этого при выполнении горных работ ниже разрезного слоя 4 ожидаемая осадка подкарьерной потолочины возрастет как минимум в 2 раза, т. е. составит не менее 128 мм/мес. При допустимой осадке предохранительного целика по проекту (0.21 м) минимальная прогнозируемая осадка от влияния очистных работ в двух подэтажах (без учета осадки рудной потолочины при отработке разрезного слоя 4) возрастет в 2 раза и приведет к дополнительному нарушению сплошности рудного массива и возможному появлению протекания рассолов через целик, что окажет негативное влияние на качество закладки.

В сложившейся ситуации, характеризующейся отсутствием надежного контроля деформационных процессов в подкарьерной потолочине и сложностью оценки объема протекания рассолов из МИВК через предохранительный целик при ограниченной возможности насосной станции для их откачки, рекомендовано приостановить ведение очистных работ в первом подэтаже (ниже слоя 4). Таким образом, выполненные измерения в ленте 33 позволили дать прогноз развития сдвижений подкарьерного массива при планируемой отработке запасов в двух подэтажах блока 1.

После завершения проходки водосборников в ноябре 2014 г. специалистами геотехнического отдела Мирнинского ГОКа начаты наблюдения за вертикальными и горизонтальными сдвигами рудного массива потолочины на отм.  $-214 \div -230$  м по оборудованным СГР и реперов ПЛ, установленных в кровле (рис. 4). Для сравнительной оценки осадок подкарьерной потолочины и рудного массива в нижней части первого подэтажа расположены реперы ПЛ в кровле закладочного штрека, пройденного в центральной части трубки выше разрезного слоя 11 (т. е. в слое 10, см. рис. 1).

В качестве иллюстрации полученных результатов геомеханического мониторинга подкарьерного массива приведем некоторые данные натурных наблюдений за 2015 г. Значения поинтервальных вертикальных сдвижений реперов по СГР1-3 незначительны, а максимальные поинтервальные деформации на СГР2 составили:  $1.42 \cdot 10^{-3}$  (0–3.5 м),  $0.2 \cdot 10^{-3}$  (3.5–9.5 м),  $0.05 \cdot 10^{-3}$  (9.5–13.5 м),  $0.18 \cdot 10^{-3}$  (13.5–19.5 м), что не превышает предела упругости кимберлита, который составляет  $3.1 \cdot 10^{-3}$  [8], и свидетельствует об отсутствии расслоений в нижней части потолочины. Поинтервальные горизонтальные смещения реперов по СГР6-10 не превышают 2 мм, что не допускает образования вертикальных водопроводящих трещин в потолочине на отм.  $-216$  м. При этом в III квартале 2015 г. по СГР5 (рис. 5), расположенной в направлении ЮЗ контакта трубки в интервале глубин 3.5–29.5 м, наблюдается образование зон разуплотнений и трещин со струйной фильтрацией рассолов, подтвержденное визуальными наблюдениями в контрольной скважине СВН5, установленной с помощью скважинного эндоскопа.

Анализ экспериментальных данных по реперам ПЛ показал следующее (рис. 6, таблица):

— наблюдается тенденция плавного оседания центральной части подкарьерной потолочины на отм.  $-214 \div -219$  м без образования зон локализации деформаций (нарушения сплошности рудного массива) на участках размещения водосборников (за исключением приконтактной зоны в СВ и ЮЗ частях трубки, т. е. CRp3 – CRp4; Rp21 – Rp25 и ЮRp2 – ЮRp4);

— квартальные оседания водосборников носят неравномерный характер. Наибольшие осадки водосборников, превышающие осадки, наблюдаемые во II квартале, отмечаются в августе – сентябре (в период подъема уровня воды в карьере из-за ремонта одного из насосов). При этом в водосборниках “Север” и “Юг” приращение осадок в конце сентября снизилось до уровня II квартала, в то время как по водосборнику “Центр” оно почти в 2 раза превысило таковые за II квартал;

— наблюдается корреляция осадок в центральной части потолочины с подъемом уровня воды в карьере;

— величины осадок рудного массива в центральной части потолочины и зоны стыковки подэтажей в центральной части трубки (в закладочном штреке слоя 10 на отм. –260 м) сопоставимы в период от начала наблюдений с мая 2014 г., что свидетельствует об их совместном перемещении в процессе отработки лент во второй “разрезке” и повышении уровня рассолов в карьере (с некоторым отставанием осадок штрека, наблюдаемым в центральной части трубки).

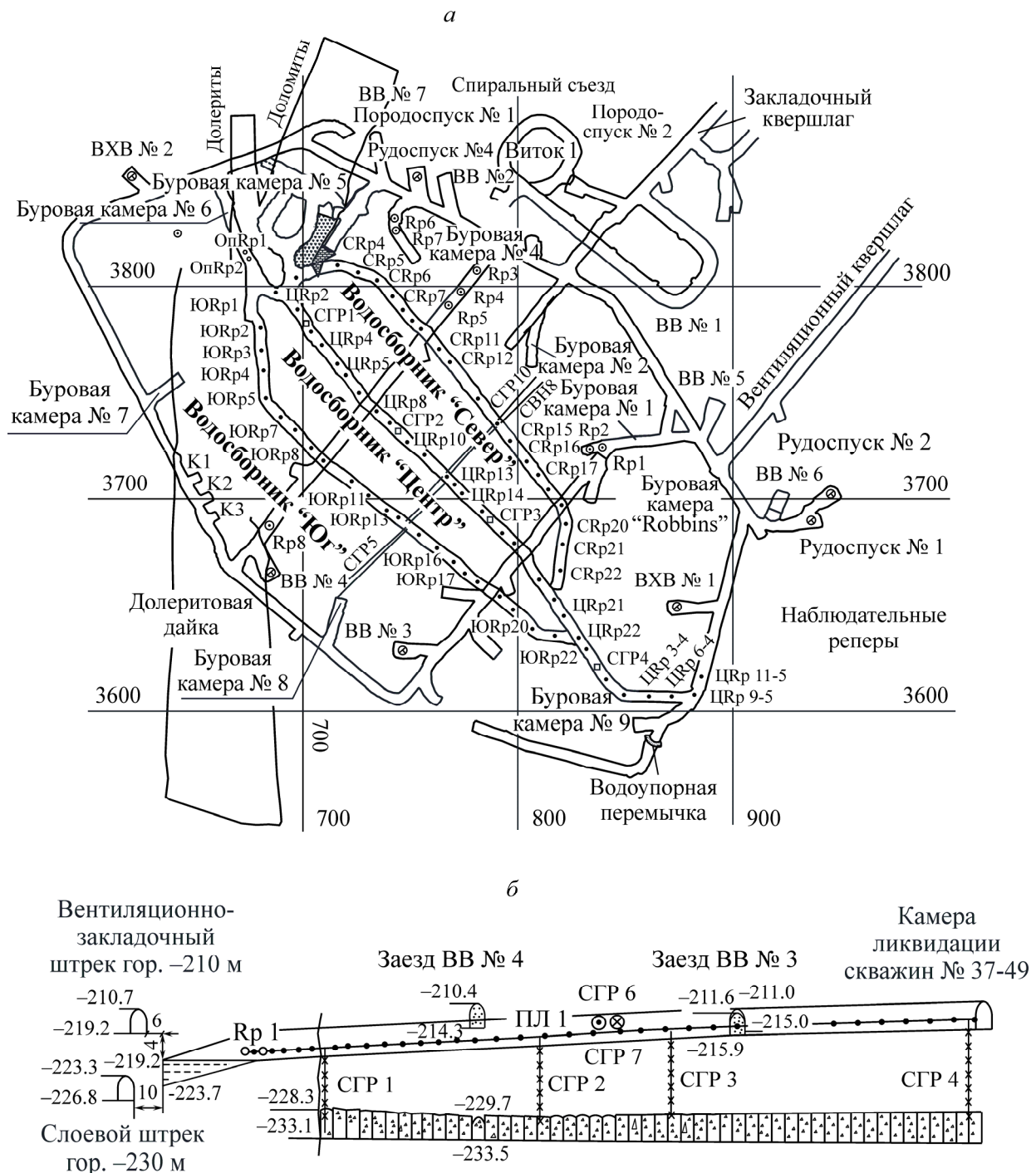


Рис. 4. Схема расположения наблюдательных станций СГР и реперов ПЛ: а — в водосборниках на отм. –214÷–219 м; б — в водосборнике “Центр”; ⊗ — устье горизонтальных скважин для СГР и СВН в борту выработки; ○●○ — опорный репер (куст из трех реперов Rp)

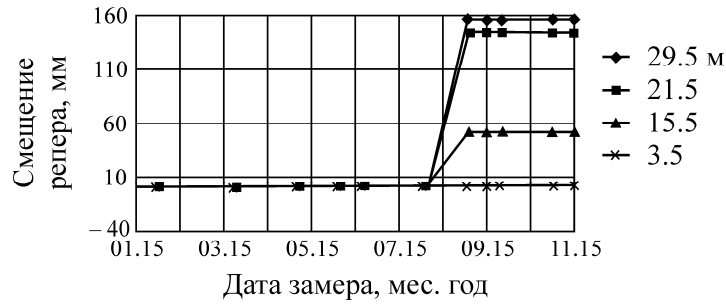


Рис. 5. Горизонтальные сдвигения реперов на станции СР5 (начало отсчета 22.01.2015)

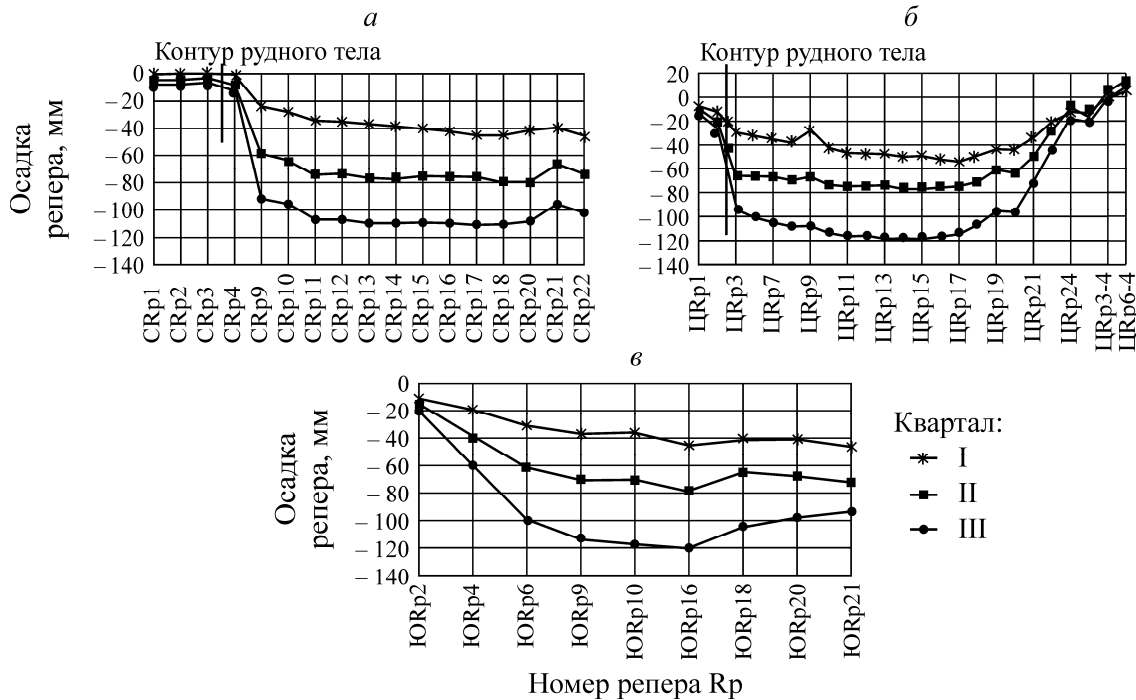


Рис. 6. Осадка реперов профильных линий в кровле водосборников: а — “Север” (начало отсчета 30.10.2014); б — “Центр” (22.10.2014); в — “Юг” (21.10.2014)

Поквартальные вертикальные сдвигения массива (мм) в центральной части водосборников на отм. –214 ÷ –219 м и в кровле штрека на отм. –260 м за 2015 г.

Выработка	Квартал			Итого от начала наблюдений (конец 2015 г.)	
	I	II	III		
Отм. –215 м	Водосборник “Север” (Rp9 – Rp22)	24 – 45	28 – 40	28 – 34	123 – 144
	Водосборник “Центр” (Rp10 – Rp20)	41 – 53	20 – 32	33 – 43	112 – 143
	Водосборник “Юг” (Rp6 – Rp20)	31 – 46	21 – 34	30 – 47	123 – 144
Штрек на отм. –260 м		52 – 80	10 – 21	30 – 41	132 – 148

Результаты маркшейдерских наблюдений за январь – июнь 2016 г. представлены изолиниями осадок с учетом осадок массива в приконтактной зоне в подходных выработках на отм. –210 м (рис. 7), что позволяет определять мульду сдвижения по любому выбранному сечению потолочины (как вкрест, так и по ее простираению). Максимальные значения осадок от начала наблюдений в центральной части потолочины превысили 250 мм.

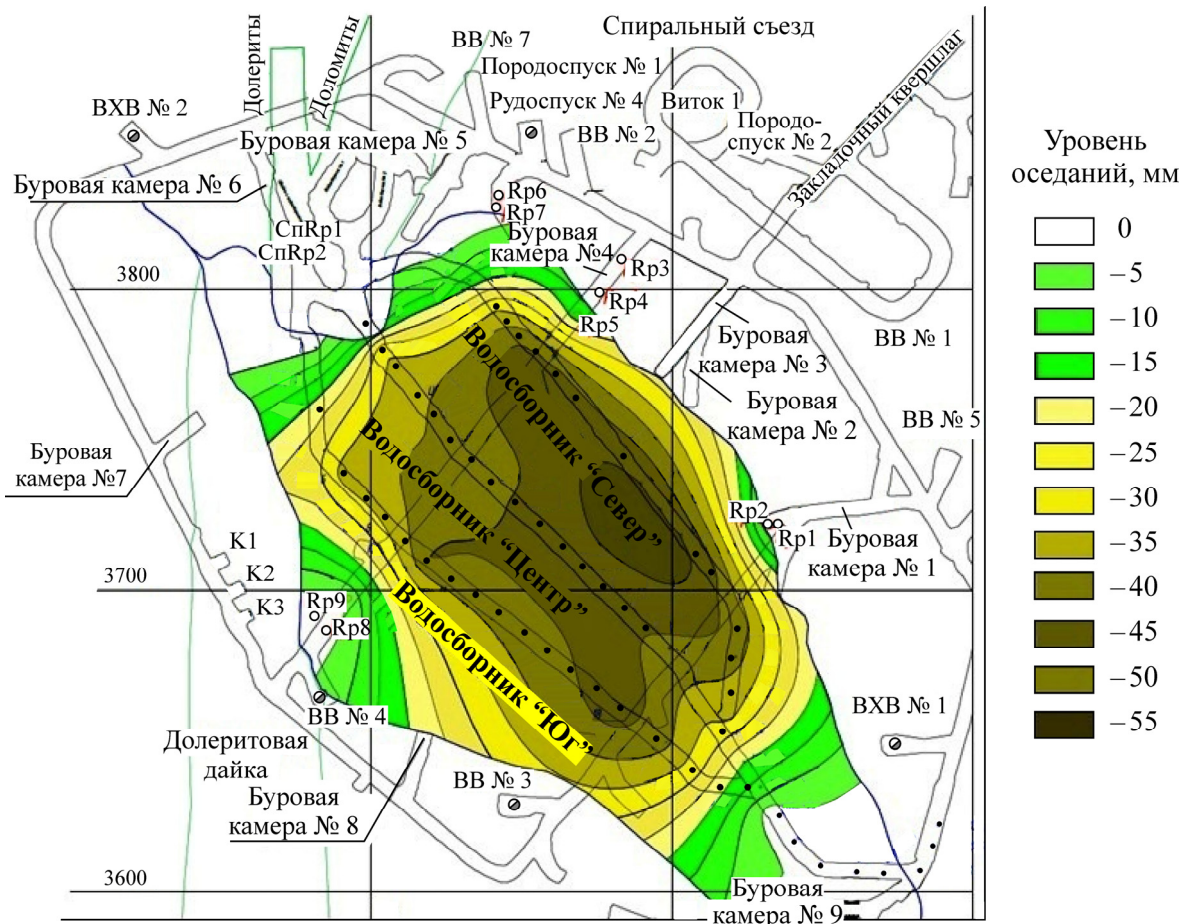


Рис. 7. Вертикальные сдвигения подкарьерной потолочины за период январь - июнь 2016 г.

В связи с предстоящей отработкой запасов верхней части блока 1, временно приостановленной до реализации мониторинга и принятия необходимых мер по водоотведению протекающего рассола со дна карьера, возрастает актуальность натуральных наблюдений за развитием геомеханических процессов в подкарьерном массиве. Измерения рекомендовано проводить периодически 2 раза в месяц с ежемесячным анализом полученных данных и ежеквартальным представлением заключений по безопасности ведения горных работ.

#### ВЫВОДЫ

Предложена система геомеханического мониторинга, обеспечивающая надежный контроль за развитием геомеханических процессов в подкарьерном массиве рудника "Мир".

Установлены особенности деформирования потолочины, главной из которых является плавное равномерное оседание центральной ее части с образованием зон локализации деформаций вдоль приконтактной зоны трубки с вмещающими породами. Максимальные осадки потолочины вблизи границы предохранительного целика за два года наблюдений достигли около 150 мм.

Результаты натуральных наблюдений за сдвигениями и деформациями рудной потолочины и их анализ используются при составлении ежеквартальных заключений для своевременного принятия мер по обеспечению безопасности горных работ при отработке подкарьерных запасов.

Для предотвращения протекания рассолов со дна карьера через предохранительный целик на руднике приняты специальные меры, включающие бурение из водосборников дренажных и при необходимости тампонажных скважин.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Комбинированная геотехнология. — М.: ИД Руда и металлы, 2003. — 560 с.
2. Кратч Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений: пер. И. А. Петухова. — М.: Недра, 1978. — 494 с.
3. Турчанинов А. И., Иофис М. А., Каспарьян Э. Н. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1977. — 504 с.
4. Крамсков Н. П., Рыльникова М. В., Калмыков В. Н. и др. Сравнительно технико-экономическая оценка вариантов систем разработок месторождения “Айхал” // Комбинированная геотехнология: развитие способов добычи и безопасность горных работ: тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Магнитогорск; Сибай, 2003. — С. 33–42.
5. Крамсков Н. П., Рыльникова М. В., Калмыков В. Н. и др. Геомеханические особенности освоения месторождения “Айхал” // Комбинированная геотехнология: развитие способов добычи и безопасность горных работ: тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Магнитогорск; Сибай, 2003. — С. 114–129.
6. Захаров В. Н., Кубрин С. С., Аверин А. П. Мониторинг и прогноз техногенных гидро-, газо- и геодинамических явлений на рудниках АК “Алроса” // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Наука, 2011. — С. 157–160.
7. Балек А. Е., Сашурин А. Д. Обоснование методики геомеханического контроля ведения горных работ в переходной зоне рудника “Удачный” // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Наука, 2011. — С. 192–195.
8. Захаров В. Н., Аршавский В. В., Филиппов Ю. А. и др. Моделирование и анализ геомеханических процессов в рудном теле и вмещающих породах при отработке кимберлитовой трубки “Мир” // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Наука, 2011. — С. 195–199.
9. Иофис М. А., Мыцких О. С. Особенности геомеханических процессов геотехнологии горных работ в переходной зоне // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Наука, 2011. — С. 145–148.
10. Инструкция по безопасному ведению горных работ при комбинированной (совмещенной) разработке месторождений рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых. — М.: Госгортехнадзор России, 1998. — 16 с.
11. Колганов В. Ф., Акимов А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. — Мирный: Мирнинская типография, 2013. — 568 с.
12. Лобанов В. В., Зельберг А. С., Слободенюк М. Е. Реализация проекта сухой консервации карьера “Мир” — важный подготовительный этап к переходу на подземную отработку месторождения // Горн. журн. — 2005. — № 7. — С. 91–95.
13. Барышников В. Д., Барышников Д. В. Организация и проведение наблюдений за сдвижением закладочного массива при его подработке // ГИАБ. — 2008. — № 12. — С. 256–261.
14. Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н. Прогноз и контроль геомеханического состояния предохранительного целика под водоносным комплексом р. “Интернациональный” // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2014. — Т. 1. — № 1. — С. 37–43.
15. Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г. Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 61–73.
16. Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н. Модернизация комбинированных открыто-подземных геотехнологий при освоении алмазоносных месторождений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — Т. 1. — № 3. — С. 265–269.
17. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности при разработке рудных месторождений. — М.: Недра, 1988. — 112 с.

*Поступила в редакцию 11/IX 2016*